

中国绿色公路建设与评估技术

张正一^{1,2}, 王朝辉¹, 张 廉¹, 王 帅¹, 曾 伟³

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省公路局, 陕西 西安 710068;
3. 天津市市政工程设计研究院, 天津 300051)

摘 要:为了解决中国绿色公路建设中目前存在的建设理念不统一、评估体系不完善等问题,通过系统梳理中国绿色公路理念发展历程,明确绿色公路建设基本思想,进而确定绿色公路基本概念;全面调查了中国 80 余条和国外部分道路以绿色、景观、生态、节能、低碳为主题的绿色公路建设概况,总结分析了现阶段国内外绿色公路的建设特点,提出中国典型区域绿色公路建设的建议;基于绿色公路建设关键技术指标,提出现阶段绿色公路评估技术要求;从绿色理念、生态保护、资源节约、节能低碳、安全智慧、服务提升、品质建设 7 个方面,构建了包括 7 类一级指标、22 个二级指标和 58 项评估内容的绿色公路评估体系,明确了不同地域自然环境及建设状况下的绿色公路可不参评指标,确定了绿色公路相应评估指标权重及评估分值计算方法,并运用该评估指标体系对中国某绿色公路进行了评估。结果表明:绿色公路评估体系可涵盖待评估公路的评价指标,具有较强的科学性和适用性;参评的绿色公路总分为 64.06,在资源节约与服务提升等方面略有不足;绿色公路评估体系对中国绿色公路的发展建设具有指导意义,可为中国绿色公路的可持续发展提供借鉴。

关键词:道路工程;绿色公路;建设;评估;方法

中图分类号:U416.06 **文献标志码:**A

Construction and assessment technology of green road in China

ZHANG Zheng-yi^{1,2}, WANG Chao-hui¹, ZHANG Lian¹, WANG Shuai¹, ZENG Wei³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Highway Bureau of Shaanxi Province, Xi'an 710068, Shaanxi, China; 3. Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin 300051, China)

Abstract: In order to solve the problems in the process of China's green road construction, such as inconsistent construction concepts and incomplete evaluation systems. The development of the green road concept in China systematically was reviewed. The basic idea of green-road construction, integrates the green-road concept was clarified, and the construction of green roads with the theme of green, landscape, ecology, energy savings, and low carbon for more than 80 green roads in China were investigated, as well as green roads abroad. A summary and analysis of the characteristics of green road in China were presented. Then, suggestions for green road construction in special areas were put forward. Based on the crucial technical indicators of green road construction, the technical requirements for evaluating a green road under at present stage

收稿日期:2017-12-10

基金项目:交通运输部标准制修订计划项目(JT2015-51);天津市交通运输科技发展计划项目(2015-B01)

作者简介:张正一(1978-),男,陕西西安人,陕西省公路局经济师,长安大学工学博士研究生,E-mail:75420667@qq.com。

通讯作者:王朝辉(1980-),男,河南滑县人,教授,博士研究生导师,E-mail:wchh0205@163.com。

were put forward. The evaluation indices system of green roads was set up from 7 aspects, such as green concept, ecological protection, resource conservation, energy-saving and low-carbon, safety and intelligence, service improvement, and quality construction. This evaluation indices system included 7 types of primary assessments 22 secondary indicators and 58 assessments. In this research, the green road non-evaluation indicators under different regional natural environments and construction conditions were defined, and the corresponding weights of the evaluation indicators and the green road evaluation score calculation method were determined. Meanwhile, the evaluation indices system was applied to evaluate a green road in China. The results show that the green road evaluation indices system can completely cover the indicators involved in the highway to be evaluated and has a strong scientific basis and applicability. The total score of the green road is 64.06 points, the green road falls short in resource conservation and service improvement. The green road evaluation indices system provides guidance for construction of China's green road, and can provide reference for the sustainable development of China's green highways. 6 tabs, 26 refs.

Key words: road engineering; green road; construction; evaluation; method

0 引言

近年来,寻求以可持续发展为核心的生态环保、资源节约、节能低碳的绿色公路受到高度关注^[1-2]。中国探索并建设了许多节能环保型公路示范工程,如思小(思茅—小孟力养)高速公路、麻昭(麻柳湾—昭通)高速公路、常张(常德—张家界)高速公路、川九(川主寺—九寨沟)公路、扬州公路等。交通运输部发布的《关于实施绿色公路建设的指导意见》(2016)和《关于全面深入推进绿色交通发展的意见》(2017)明确指出,要将绿色公路建设作为未来公路建设的主要方向。中国绿色公路快速发展,但建设过程中仍存在目标不明确、过程不规范等问题,直接导致现阶段绿色公路建设质量良莠不齐,严重阻碍绿色公路长期可持续发展,研究人员现已逐步认识到绿色公路评估技术对规范绿色公路发展的重要性。

许多道路领域的专家学者和机构开展了相关研究。美国华盛顿大学和美国联邦公路局分别构建了Greenroads系统和INVEST系统,通过得分高低来评价工程的可持续性。Santos等建立了能源消耗、环境友好的评估模型^[3]。Jabbarpour等采用蚁群算法结合燃油消耗模型,对污染物排放进行了评估^[4]。Naderipour等利用综合模型测量方法,对车辆行驶中CO₂、NO_x、CO的排放量进行了测量和评估^[5]。Rao等基于铁路隧道健康评价模型,确定了公路隧道的健康安全定量评价指标及其权重^[6]。云南省编制的地方标准《绿色公路评价标准》,规定了绿色公

路建设中生态环保、资源节约的评价要点^[7]。王晋等从公路设计、施工、养护3个方面,构建了绿色低碳公路评价指标体系^[8]。李满良等从设计、道路功效、节能减排、绿化、环保5个方面,提出了绿色生态型城市道路评价指标体系^[9]。郝培文等建立了基于控制项和自选项的绿色公路评价体系^[10]。蒋育红等以服务、环保、综合效益为总体目标,建立了绿色交通规划评价指标体系^[11]。张琴着重评价了公路设计、施工、运营3个阶段涉及到的生态和资源类指标^[12]。综上所述,现阶段国内外对绿色公路的评估主要是针对公路建设和运营阶段,评估范围相对较窄且评估指标不够完善系统,国外绿色公路评估模型在中国应用也有一定的局限性。

鉴于此,本文在梳理中国绿色公路理念发展历程基础上,明确绿色公路建设的基本思想,确定绿色公路概念,全面调查总结国内外绿色公路建设概况及特点,分析中国绿色公路创新实践情况,提出中国特殊地区绿色公路建设的建议,阐明现阶段绿色公路的评估技术要求,并构建评估体系;明确不同地域自然环境及建设状况下的绿色公路可不参评指标,确定绿色公路评估指标权重及评估分值计算方法,以期为中国绿色公路的可持续发展提供参考。

1 绿色公路理念

1.1 绿色公路理念发展历程

1986~1990年期间,《交通部关于加强公路绿化工作的若干意见》(交公路发[1988]322号)提出,在持续增加公路总量的基础上,加强公路绿化工作

的实施,道路绿化林带得到大发展。1991~1995 年期间,“八五交通发展重点专项规划”提出,加强道路结构优化调整,提高公路运输能力、运输效率,改善公路服务质量。1996~2000 期间,《关于进一步推进全国绿色通道建设的通知》(国发[2000]31 号)提出,建设绿色通道,改善沿线生态环境,落实关于建设秀美山川的重大举措。2001~2005 年期间,《关于开展创建“绿色交通示范城市”活动的通知》(建城[2003]169 号)提出,坚持“以人为本”的原则,通过推广应用交通工程新技术、运营管理新方法,建设生态环保型交通。2004 年全国公路勘察设计工作会议提出“六个坚持,六个树立”的公路勘察设计新理念。2005 年交通运输部公路司发布《新理念公路设计指南》,为新理念公路的勘察设计提供了指导。2006~2010 年期间,《关于加强公路规划和建设环境影响评价工作的通知》(环发[2007]184 号),推动了公路规划环评工作的开展,并强化了对公路穿越环境敏感区的环境保护要求。

“十二五”期间,《关于进一步加强公路水路交通运输规划环境影响评价工作的通知》(环发[2012]49 号)、《加快推进绿色循环低碳交通运输发展指导意见》(交政法发[2013]323 号)、《绿色循环低碳交通运输公路考核评价指标体系》(交节中心发[2013]28 号)等均提出节能低碳建设理念,制定和运用节能低碳相关评价指标对公路进行客观评价,以促进公路建设向绿色、循环、低碳方向发展。2014 年交通运输部提出加快推进“综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通”发展的战略决策,为交通运输科学发展指明方向。《关于 2014~2015 年节能减排低碳发展行动方案的通知》(国办发[2014]23 号)指出,应强化交通运输节能降碳,开展绿色低碳交通运输体系建设试点。“十三五”期间,发布的《交通运输节能环保“十三五”发展规划》(交规划发[2016]94 号)、《关于实施绿色公路建设的指导意见》(交办公路[2016]93 号)中指出,应促进公路发展转型升级,建设以质量优良为前提,以资源节约、生态环保、节能高效、服务提升为主要特征的绿色公路,实现公路建设健康可持续发展。《推进智慧交通发展计划(2017~2020)》(交办规划发[2017]11 号)指出,应有效提升交通运输数字化、网络化、智能化水平,明确了智慧交通发展的工作思路和主要目标。《推进交通运输生态文明建设实施方案》(交规划发[2017]45 号)指出,将绿色发展理念融入交通运输发展全过程,切实推进交通运输行业转型升级和提质增效。

综上,随着中国公路建设绿色化不断完善升级,其发展理念不断得到丰富和提升,绿色公路的建设已由 20 世纪末单纯注重绿化的林荫大道,过渡到以质量优良为前提,资源节约、生态环保、节能高效、科技创新、服务提升全方位并重的绿色公路。

1.2 绿色公路概念的确定

通过对公路绿色理念发展历程的分析可知,中国绿色公路建设发展的基本思想为:绿色公路建设应遵循国家可持续发展主旨,在公路全生命周期中最大限度地减少资源消耗,并最大限度地减少公路废弃物排放,从而减少公路对自然生态环境的污染,实现公路与自然生态环境和谐发展,创建舒适、和谐、健康、安全的交通环境,同时在文化层次上注重保护历史风貌和自然景观。本文基于系统论和生命周期成本思想^[13-14],对绿色公路作如下定义:绿色公路是在公路全寿命周期内,以创新、协调、绿色、开放、共享为发展理念,最大限度地控制资源占用、降低能源消耗、减少污染排放、保护生态环境,注重建设品质提升与运行效率提高,为人们提供安全、舒适、便捷、美观的行车环境,与自然和谐共生的公路。

2 绿色公路建设概况与评价

2.1 绿色公路建设概况

许多国家对绿色公路建设进行了研究,中国各地也基于国家政策指导,积极发展绿色公路,建设了众多以绿化、景观、生态、节能、低碳为主题的绿色公路示范工程。本文全面调查了国内外绿色公路,有代表性的绿色公路如表 1、表 2 所示。

由表 1 可知:目前一些国家积极发展绿色公路,建设中强化对道路沿线景观、节能环保、降低温室气体排放等方面的考量,但公路建设只考虑单个影响因素作用,并未兼顾诸多影响因素的共同作用,绿色公路建设定位较为单一。

由表 2 可知:现阶段中国绿色公路建设已初具规模,全国各省市因地制宜建设了一批景观公路、低碳公路、生态公路示范工程,绿色公路建设过程中采用诸多新理念、新技术、新工艺、新材料等创新实践。理念创新立足公路交通转型发展的迫切需要,强调节能减排、资源节约、服务提升、智慧高效在公路建设中的重要性,诸如绿色理念、智能交通理念、美丽高速理念、品质工程建设理念等;技术、工艺创新强化对先进技术的开发引进,为绿色公路建设注入强大动力,如建筑信息模型技术、新能源技术、钢结构桥梁、充电桩与加气站、ETC 技术拓展、新媒体信息

表 1 国外绿色公路建设概况

Tab. 1 Construction overview of green road in abroad

| 国家 | 名称 | 特点 |
|------|-----------|--|
| 美国 | 1 号高速公路 | 穿越 42 座跨海大桥,连通佛罗里达州大陆和佛罗里达群岛,公路建设与自然景观融为一体。 |
| | 苏厄德高速公路 | 侧重道路两侧生态环境及生物栖息地的保护,连接多个旅游景点,是一条极具旅游意义的公路。 |
| | 476 号高速公路 | 通过设计专门的照明设备,以防破坏夜间的生态环境。 |
| | 66 号高速公路 | 路线穿过千禧公园、胡佛大坝等自然景观,并融入了厚重的西部风情和历史韵味,是一条举世闻名的人文景观大道。 |
| 新西兰 | 43 号国道 | 完美保留了公路周边的绿色植被,被称为“遗忘的世界之路”。 |
| 挪威 | 大西洋公路 | 具有匠心独特的工程设计和独具魅力的沿线景观,被称为“通往未知之地的桥梁”。 |
| 法国 | Wattway | 充分利用该地区丰富的太阳能,强化对清洁能源的利用,全球第一条具备太阳能发电能力的公路。 |
| | 163 国道 | 公路穿过阶梯排布的村镇以及环境优美的地中海,被联合国教科文组织称为“绝美而典型的地中海风光”。 |
| 澳大利亚 | 海岸高架公路 | 连接 29 座海滩和 4 个国家公园,形成了一幅具有立体感的壮阔海景,被称为伊勒瓦拉休闲海岸。 |
| 埃及 | 沿海沙漠公路 | 将被誉为“红海之都”的洪加达与千古名城开罗连接,途经埃及博物馆、狮身人面像、金字塔,形成一条举世闻名的文化景观公路。 |
| 越南 | 海云通道 | 公路从岬巷到顺化,穿越茂密的海边森林以及 Ai Van Son 山的顶峰,称为“被遗弃的完美彩虹”。 |

表 2 中国绿色公路建设概况

Tab. 2 Construction overview of green road in China

| 省份 | 名称及建设时间 | 特点 |
|----|-------------------------|--|
| 四川 | 川九公路(2002 年) | 设计采用“露、透、封、诱”的原则,并突出当地藏羌文化特点,赋予公路文化特色,运用环境恢复性技术、防护工程修饰美化技术、设施景观美化关键技术保证公路的生态美观 ^[15] 。 |
| | 花久(花石峡—久治)高速公路(2013 年) | 采用供电、节能照明及热水供应系统,草皮移植“无痕化”施工技术,并结合实际地形增设港湾停车带等休息区,增强运行安全性。 |
| 云南 | 麻昭高速公路(2013 年) | 采用路面压电技术、原材料冷再生技术、隧道弃渣利用及低能耗通风照明技术、数字路面智能监控技术,建筑信息模型(BIM)系统探索绿色低碳公路建设。 |
| | 思小公路(2003 年) | 隧道采用零开挖进洞技术有效保护植被,设置生物通道保护生物多样性,应用边坡生物恢复技术进行生态恢复并将傣族文化融入公路沿线,突显公路建设的节能生态文化理念 ^[16] 。 |
| | 武易(武定—易门)高速公路(2015 年) | 积极推广拌合楼油改气、稳定型橡胶沥青路面铺筑等节能技术,将磷石膏无害化处理后硬化作为路基材料,采用环境检测关键技术系统进行环境保护,在服务区内应用太阳能光伏发电设备、太阳能热水器供水、污水回用系统并设置了充电桩。 |
| | 香丽(香格里拉—丽江)高速公路(2016 年) | 运用了 PPP(公私合营模式)建设模式,并采用太阳能供水供电、LED 节能、生态边坡防护等新技术,实现公路与生态相融共生的理念。 |
| 贵州 | 道安(道真—瓮安)高速公路(2011 年) | 运用节能减排技术提高能源利用效率,普及温拌沥青技术使公路的建设及使用更加环保。 |
| | 贵黄(贵阳—黄果树)高速公路(2007 年) | 采用了陶粒混凝土声屏障技术、客土喷播技术,降低公路噪音对生态的影响,使公路与生态更加和谐 ^[17] 。 |
| | 盘兴(盘县—兴义)高速公路(2015 年) | 运用智能光伏隧道照明、零开挖进洞、油改气、节水高分子薄膜、集中供电等新技术,打造绿色低碳示范工程。 |
| 西藏 | 拉林(拉萨—林芝)公路(2013 年) | 采用生态袋、生态毯等柔性生态护坡绿化技术,对公路边坡和生态进行恢复,保证环境的完整性。 |
| | 拉萨至贡嘎机场专用公路(2009 年) | 采用太阳能系统照明以及智能监控系统技术保证了道路的节能安全性能,同时在全线覆盖融入藏族文化元素设计景观,使公路更具有文化气息。 |
| 重庆 | 成渝高速公路(2009 年) | 采用 Thiopave 改性温拌技术、厂拌热再生技术、低碳服务区、太阳能照明系统等多项低碳环保技术,保证道路的低碳性能,并采用信息技术对公路进行宣传和监督 ^[18] 。 |
| | 渝蓉高速公路(2010 年) | 采用温拌沥青和橡胶沥青、LED 隧道照明低碳节能设备降低能源消耗与环境污染,并将“黑匣子”引入公路施工,保障公路安全性能。 |
| 宁夏 | 东毛(东山坡—毛家沟)高速公路(2008 年) | 积极推广自动铺设防水板台车、高性能混凝土施工、隧道混合通风等技术,推进绿色低碳环保公路建设。 |

| 续表 | | |
|----|----------------------------|--|
| 省份 | 名称及建设时间 | 特点 |
| 新疆 | 天山景观大道 (2009 年) | 应用客土喷播工艺、陶瓷拦水带材料对路堤边坡进行预防性养护,运用智能化管理技术强化道路管理。 |
| | 新疆沙漠公路(2005 年) | 采用先进的滴灌技术,保证了道路两侧植物的成活率,先进的固沙技术保证公路防风固沙效果。 |
| | 麦咯(麦盖提—喀什) 公路(2011 年) | 运用水力插板技术、沥青混合料动态质量监控系统、FYT1 型防水涂料、数字化技术等新技术、新材料保证公路的品质建设。 |
| | 那拉提盘龙谷道 (2012 年) | 针对当地降雨量大、冬季冻融等特点采取盲沟排水技术,通过对路侧的高混凝土挡墙进行外挂铅丝笼内置腐植土使构造物与环境相容。 |
| 甘肃 | 庆阳木钵至板桥段 (2013 年) | 运用沥青路面冷再生、高分子路面裂缝贴处治等技术提高路况质量,打造低碳绿色公路。 |
| | 平定(平凉—一定西) 公路(2005 年) | 积极推广沥青路面现场冷再生和热再生技术应用、预防性养护技术、隧道节能照明技术,提高资源利用率,减少能耗。 |
| | 雷西(雷家角—西峰) 高速公路(2010 年) | 采用 Superpave 技术延长公路寿命,百页钢板镶嵌有机钢化玻璃设置声屏障,高性能聚乙烯材料,精心打造人文生态高速公路。 |
| | 兰州南绕城高速公路 (2010 年) | 采用腐殖土再生、自动喷淋循环养护、智能通风等新技术降低能源消耗,并通过提高 ETC 覆盖率,减少有害气体的排放。 |
| 陕西 | 榆靖(榆林—靖边) 高速公路(1999 年) | 提出并应用了沙漠高速公路路基施工的机械选择、组合及压实工艺,通过玻璃纤维格栅技术有效防止裂缝反射,并遵循适地适树、生物多样性和植物多功能等原则进行生态景观公路的建设 ^[19] 。 |
| | 西宝(西安—宝鸡) 高速公路(2009 年) | 运用污水生态式处理和循环利用技术、泡沫沥青厂拌冷再生技术,实现水资源循环利用和减少污染的目的,采用喷播和土工格室技术进行边坡美化。 |
| | 西汉(西安—汉中) 高速公路(2002 年) | 应用卫星遥感、航测图像综合分析、全球定位系统、边坡柔性防护 SNS(安全防护网系统)、生态恢复等技术,并在道路沿线设置彰显秦岭历史文化的雕塑群,提升公路品质。 |
| | 黄延(黄陵—延安) 高速公路(2002 年) | 推广应用透视成像检测技术、斜向预应力、温拌沥青和高黏复合改性橡胶沥青等新技术,提高公路科技含量,推进品质工程建设。 |
| | 西咸北环线(2013 年) | 应用建筑垃圾再生材料、节能环保设备和废旧轮胎橡胶粉沥青路面等环保技术,实现环保公路的建设。 |
| 青海 | 峨祁(峨堡—祁连) 公路(2014 年) | 采取草皮回植、环保草毯植被防护、三维结构柔性生态袋防护等措施绿化公路边坡,通过混凝土构造物滑模施工工艺提高施工效率和工程质量。 |
| 湖南 | 常张(常德—张家界) 高速公路(2002 年) | 运用沥青路面再生密封剂、仿原生态植被恢复技术,并通过设置具有湘西文化的楼阁式服务区及收费站站亭等沿线设施,打造生态人文景观道路。 |
| | 南益(南县—益阳) 高速公路(2015 年) | 采用集中电网供电、混凝土智能喷淋养生系统、腐殖土再生、T-C 钢管桩、气泡混合轻质土等先进技术,以及设置生态隔离栅、生态边沟等措施,打造节能生态公路。 |
| | 长湘(长沙—湘潭) 高速公路(2009 年) | 采用零仰坡进洞法、生态浅碟形暗排水沟、桥面径流污染防控、模块化生态声屏障等技术、工艺强化公路的环保性能,并构建了高速公路突发灾害预警和应急体系保障公路安全性能 ^[20] 。 |
| 湖北 | 神宜(神农架—宜昌) 公路(2006 年) | 采用生态挡土墙技术、路侧余宽绿化技术、半桥半路与悬挑板技术、渐缩式空心砖护面墙绿化技术、彩色防滑铺路料、彩色立体减速标线等技术、工艺,突显生态、人文特色。 |
| | 谷竹(谷城—竹溪) 高速公路(2009 年) | 运用边坡喷播植草、三维土工网植物护坡、隔音罩、三辊轴施工等技术,实现施工环保、道路美化。 |
| | 环丹江口库区生 态公路(2013 年) | 主要节点设置自行车租赁站,以避免生态区环境的破坏与污染,并在道路沿线融入极具特色的地域文化元素。 |
| 河南 | 三淅(三门峡—淅川) 高速公路(2010 年) | 利用隧道弃渣及收集腐殖土造地、智能化节电、生态槽净水等新技术,保证路面的节能减排性能。 |
| | 登封文化景观大道 (2008 年) | 通过将道路沿线的文化景观和道路两侧的绿化美化联系起来,把“文化景观大道”标志出来。 |
| 江西 | 昌樟(南昌—樟树) 高速公路(2011 年) | 运用温拌沥青混合料、老路床过湿土处理技术、耐久性路面、沥青拌合楼油改气、水损害综合处治技术、太阳能并网发电、碳汇林营造工程、ETC 等技术、工艺,推行低碳公路的建设。 |
| | 上武(上饶—武夷山) 公路(2009 年) | 运用 TLA 改性沥青、客土种植、喷播草籽等技术,实现公路的生态美观建设,并注重道路的文化气息。 |

| 续表 | | |
|----|---------------------------|---|
| 省份 | 名称及建设时间 | 特点 |
| 山东 | 青临(青州—临沐)高速公路(2009 年) | 积极推广沥青再生技术、边坡修复技术,精心打造绿色、生态公路,并通过一系列的专业培训,提升公路的服务品质 ^[21] 。 |
| | 青岛滨海公路(2000 年) | 运用“灵活、宽容、创作”的建设理念,灵活运用指标标准,使公路与自然环境相协调,通过设置港湾式停车带使公路更加方便、安全。 |
| 江苏 | 溧白(溧水—白马)高速公路(2009 年) | 采用 PSP 乳化沥青、温拌沥青路面施工、材料再利用等技术,打造绿色生态干线公路。 |
| | 武进环湖东路(2011 年) | 运用透水路面技术、风光互补照明新技术,降低能耗,打造“低碳示范”公路。 |
| | 高邮公路(2012 年) | 采用温拌沥青、桥梁预应力智能施工、漫水路面结构施工等技术,实现节能减排的目的。 |
| | 扬州公路(2013 年) | 利用冷补料、微表封层等新技术,延长公路的使用寿命,降低能源消耗;采用光纤主干环网技术、LONWORKS 现场控制网络技术,以及监控数据、报警及视频信息联网传输技术,对高速公路全线进行供配电,保障公路安全畅通 ^[22] 。 |
| 安徽 | 泾云景观公路(2011 年) | 实施隧道光伏发电和 LED 照明设施节能改造,并在公路建设中穿插区域文化,形成集节能、文化、景观于一体的景观大道。 |
| | 岳武(岳西—武汉)高速公路(2011 年) | 采用框格梁复合植被毯生态护坡技术及框格梁植生袋护坡技术进行边坡植被修复,应用隧道明色封装薄层、拌合楼油改气等技术保证公路的节能低碳性能 ^[23] 。 |
| 浙江 | 宁杭(南京—杭州)高速公路(2005 年) | 采用智能沥青洒布技术,生态防护技术,并通过设置景观台,保证良好的路用性能,采用中水回用系统实现节约用水 ^[24] 。 |
| | 杭浦(杭州—上海浦东)高速公路(2004 年) | 采用 Superpave 技术、现浇箱梁排架搭设技术提高道路性能,智能化监控技术进行交通引导,碳汇技术监控碳排放引导交通绿化。 |
| | 常嘉(常熟—嘉兴)高速公路(2012 年) | 采用钢结构、桥面排水、混凝土箱梁养生工艺等技术、工艺,对生态及水资源进行有效保护。 |
| | 杭长(杭州—长兴)高速公路(2012 年) | 运用温拌或高模量沥青混合料、低碳桥面铺装技术、污水中水回用技术强化公路低碳环保,并运用车辆超限超载不停车预检系统保障行车流畅,减少污染气体排放。 |
| 上海 | 杨高南路(2015 年) | 采用 BIM 技术对隧道三维立体协同设计,保障其安全性与便捷性。 |
| | 世博园区公路(2009 年) | 将温拌技术与排水沥青路面有机结合,采用土壤固结剂稳定建筑垃圾进行材料再利用,并在公路沿线建立雨水收集利用系统。 |
| 福建 | 沈海(沈阳—海口)高速公路(2002 年) | 通过精细化设计种植不同种类的植物,营造道路两侧梯次美感,推行节能技术并对道路沿线桥梁进行精细化研究、设计,保障公路的节能和耐久性。 |
| | 宁武(宁德—武夷山)高速公路(2008 年) | 通过边坡绿化、构建植物复层结构以及设置园林景观等措施,增加公路的人文气息,运用遥感技术、数字图像处理技术提高公路建设效率。 |
| 海南 | 海榆西线(2010 年) | 通过多元化市场融资模式,创新性地解决高速公路建设的资金问题,以保护民族风情为前提,实现道路交通、景观、游憩和保护功能的有机结合。 |
| | 海文(海口—文昌)高速公路(2013 年) | 将原来的水泥混凝土路面改为沥青混凝土路面,完成海南省首条“白”改“黑”高速公路建设,采用轻质维修材注浆技术对路面进行快速修复。 |
| 广东 | 渝湛(重庆—湛江)高速公路(2001 年) | 运用边坡生物防护、生态水沟建造、生态型桥梁锥坡建造、生态型声屏障建造等技术,完成生态公路的建设,保证路况的环保和美观 ^[25] 。 |
| | 广佛肇(广州—佛山—肇庆)高速公路(2012) | 采用隧道喷淋养生、服务区中水回用、LED 照明等新技术,并通过设置 ETC 不停车收费系统、超载超限不停车预检系统、温拌沥青混凝土施工工艺,确保公路的环保、优质、安全性能。 |
| | 广中江(广州—中山—江门)高速公路(2010 年) | 采用橡胶粉改性沥青、节能型施工机械、LED 及高反射节能灯,降低能源消耗与环境污染。 |
| 广西 | 钦崇(钦州—崇左)高速公路(2008 年) | 收费站采用自动发卡技术使行车流畅,利用自动控制技术控制 LED 灯光亮度,强化节能环保。 |
| | 桂阳(桂林—阳朔)公路(2003 年) | 使用不停车检测系统、治超信息查询系统、监控系统三大科技保证行车流畅,并通过景观恢复实现公路生态景观建设。 |
| | 柳南(柳州—南宁)高速公路(2016 年) | 运用数字化施工技术,提高公路质量,采用耐久性路面结构、电网集中供电、桥面径流净化与事故处理系统、车辆超限超载不停车预检、生态护面墙等新技术工艺,打造节能环保公路。 |
| | 乐百(乐业—百色)高速公路(2015 年) | 通过将传统声屏障降噪技术与光伏太阳能发电技术结合,采用 LED 节能照明及智能照明调控系统、太阳光伏、隧道零开挖进洞等技术,打造绿色低碳公路。 |

| 续表 | | |
|-----|-------------------------|---|
| 省份 | 名称及建设时间 | 特点 |
| 内蒙古 | 银巴(银川—巴彦浩特)公路(2008 年) | 应用了草方格工程固沙、人工撒播草种和飞播草种植草等生态修复技术,减缓沙漠东移对公路的影响。 |
| 山西 | 晋济(晋城—济源)高速公路(2005 年) | 建设以环保站环境监测中心为核心的环境监测网络,对影响环境的一系列问题进行智能化监控。 |
| | 忻阜(忻州—阜平)高速公路(2006 年) | 采用废胎胶粉筑路技术、温拌沥青混合料、隧道节能照明、太阳能综合利用及主动发光安全诱导技术,保障公路的节能、安全。 |
| 河北 | 石安(石家庄—临漳)高速公路(2011 年) | 运用植物纤维毯边坡防护、沥青拌合楼油改气、热再生、微表处等新技术,探索生态低碳公路的建设。 |
| | 京港澳高速公路(2012 年) | 运用橡胶改性沥青、泡沫沥青冷再生、太阳能光伏发电、污水回收处理、废料回收再利用等技术,降低能源消耗,减少污染。 |
| | 张石(张家口—石家庄)公路(2004 年) | 彰显以人为本设计理念,运用胶粉改性沥青技术、防砂固砂技术,提升路面质量,延长公路使用寿命。 |
| | 张承(张家口—承德)高速公路(2015 年) | 应用寒冷地区耐久性路面建设技术、客土喷播技术,并在沥青混合料中添加环保型沥青路面冰雪抑制剂。 |
| 天津 | 中新生态城绿色生态型道路(2008 年) | 应用淤泥固化、温拌胶粉改性沥青、排水性沥青路面等环保新技术,在人行道铺设生态砂透水砖,并在生态道路上进行雨水收集,保障道路两侧绿化。 |
| 黑龙江 | 哈阿(哈尔滨—阿城区)高速公路(2010 年) | 运用旧路沥青混凝土废弃料重加工、乳化沥青冷再生、地质雷达探测等技术,实现节能低碳交通。 |
| 辽宁 | 沈大(沈阳—大连)高速公路(2002 年) | 采用旧路面加铺技术、地热再生技术、全程自动化监控系统,保证道路的节能和行车安全。 |
| 吉林 | 鹤大(鹤岗—大连)公路(2011 年) | 应用隧道保温防冻技术、隧道温拌阻燃沥青、互通立交区植被生态恢复技术、照明节能与智慧控制技术、腐殖土回填等技术、工艺,降低能源消耗,保证公路的耐久性 ^[26] 。 |
| 台湾 | 台 24 线(2011 年) | 道路两侧充满艺术气息的原乡部落三地门、雾台及德文风景区,共同构成了南台湾最美的景观道路,且通过布设充电桩、加气站提升公路品质。 |

技术、绿色边坡防护、污水处理及水循环工艺、拌合站油改气等;材料创新加强清洁材料、功能型材料的应用,如温拌、冷拌冷铺沥青混合料,粉煤灰、煤矸石、矿渣及隧道弃渣等的循环利用,降温路面、尾气净化路面等新型功能材料研发。

2.2 典型区域绿色公路建设的建议

绿色公路在充分结合区域特点,强化内涵、品质建设的同时,也应逐步加强生态敏感、脆弱等特殊区域的公路建设。本文基于现阶段中国绿色公路特点,提出如下建议。

(1)沙漠、戈壁。运用先进的防风固沙、植物再生技术,缓解风沙对公路的影响,美化公路沿线景观;利用太阳能与风能充足、人口密度低、扰动少的特点,运用新技术、新工艺将太阳能与风能进行收集转换,提高公路建设品质。

(2)森林。合理选择路线方案与设计指标,减少公路建设对森林的破坏;运用生态景观恢复技术,强化生态恢复,保护沿线景观,增加桥隧比,避免自然区分割;通过在道路沿线设置碳汇林净化空气,并设置生物通道保护生物多样性。

(3)草原。草原生态较脆弱,必须采用先进的生态施工及生态恢复技术,保证固有生态系统稳定性;针对草原地形平坦辽阔、景色优美的特点,增设港湾停车带、观景台等休息区,增加人文与安全性能。

(4)江河、湖泊。江河、湖泊地区生态敏感,应运用绿色材料与清洁能源,并结合先进的污水收集与污水处理、钢结构等技术,降低水环境污染;利用水资源丰富、环境优美的特点,合理设计公路线形,使之与沿线水域生态环境相融合。

(5)冰川、雪地。选用先进、合理的设计理念与评价指标,避免生态环境的破坏;针对外界生物扰动少、积雪频繁等特性,将太阳能、发电路面、新媒体信息等新技术应用于道路建设使用过程中,提高路用性能及安全性能;并利用植物板、腐殖土再生等绿色施工工艺,进行植被恢复,改善公路沿线景观。

3 绿色公路的评估

3.1 绿色公路评估指标体系拟定

3.1.1 绿色公路评估指标及权重分值拟定

本文从公路建设全寿命周期出发,以保护生态

环境、提升自然资源利用效率、减少不可再生资源消耗、建立安全舒适公路环境为目标,从绿色设计、资源节约、生态环保、路面功能拓展、绿色施工管理、绿色养护、绿色运营管理和绿色交通设施等方面,构建绿色公路评估体系基本框架。深入陕西、天津、湖南、云南等地多个公路工程建设、管理单位实地调研,同时与中国公路学会道路工程分会、交通运输部规划研究院、交通运输部公路科学研究院、中交第一公路勘察设计研究院的专家学者反复论证,逐步完善,最终以:绿色理念、生态保护、资源节约、节能低碳、安全智慧、服务提升、品质建设 7 个方面构建绿色公路评估指标体系,见表 3。该体系包括 7 个一级指标、22 个二级指标和 58 项评估内容(三级指标)。绿色理念指导绿色公路发展的战略计划和文化思想;生态保护为绿色公路发展对自然环境的影响;资源节约为绿色公路发展对自然资源的占用情况;节能低碳为绿色公路发展对能源消耗和碳排放的控制情况;品质建设为新时期、新形势下绿色公路发展对公路工程建设水平提升的要求;安全智慧为绿色公路发展对交通安全和智慧运营的新要求;服务提升为绿色公路发展对公路服务功能的拓展情况。为明确绿色公路评估体系各指标权重,汇总分析公路工程科研、设计、建设、教学和管理领域 30 余名专家打分结果,基于德菲尔赋权法与层次分析法,最终确定评估指标分值如表 3 所示。绿色公路评估指标体系中三级指标的具体评分项及其分值分配可参见《绿色交通设施评估技术要求》(JT/T 1199.1—2018)第 1 部分:绿色公路。

3.1.2 绿色公路可不参评指标确定

绿色公路评估标准适用于新建、改扩建的二级及以上等级公路。不同地域、自然环境下或新建与既有公路的建设状况一般存在一些差异,具有相对独立性。对某一具体评估对象,评估指标不一定全部适用,如平原地区公路项目不存在隧道的相关评估指标,或是新建项目不存在旧路面材料再生相关评估指标等。因此,本文综合考虑评估公路所处地域自然环境及建设状况,提出可不参评的绿色公路评估指标,如表 4、表 5 所示。

3.1.3 绿色公路评估分值计算

绿色公路评估满分为 100 分,各级指标按权重分配分值。当公路评估中存在不参评指标时,参与评估的指标总分值则不足 100 分,需对评估分数进行换算,有

| 表 3 绿色公路评估指标体系 | | | | | | | |
|---|-----|---------------------|------|--------------------|------|---------|-----|
| Tab.3 Evaluation indexes system of green road | | | | | | | |
| 一级指标 | 分值 | 二级指标 | 分值 | 三级指标 | 分值 | | |
| 绿色理念 | 8 | 战略 | 5.5 | 战略规划 | 4.0 | | |
| | | | | 专项资金 | 1.5 | | |
| | | 文化 | 2.5 | 培训 | 2.0 | | |
| | | | | 宣传活动 | 0.5 | | |
| 生态环保 | 15 | 生态保护 | 4.5 | 生物及其栖息地/ 生态环境保护 | 1.5 | | |
| | | | | 生态修复 | 2.0 | | |
| | | | | 植被恢复效果 | 1.0 | | |
| | | 水土环境 保护 | 3.5 | 水体保护 | 2.0 | | |
| | | | | 土体保护 | 1.5 | | |
| | | 空气环境 保护 | 5.0 | 污染气体排放控制 | 2.0 | | |
| | | | | 扬尘控制 | 2.0 | | |
| | | | | 场站布置 | 1.0 | | |
| | | 声光环境 保护 | 2.0 | 声污染防治 | 1.0 | | |
| | | | | 光污染防治 | 1.0 | | |
| 资源节约 | 20 | 土地资源 节约、集 约利用 | 5.0 | 土地占用 | 3.0 | | |
| | | | | 土石方填挖 | 1.0 | | |
| | | | | 临时用地控制 | 1.0 | | |
| | | 水资源节 约、集约 利用 | 3.0 | 排蓄水工程 | 1.5 | | |
| | | | | 污水处理与利用 | 1.0 | | |
| | | | | 节水措施 | 0.5 | | |
| | | 材料节约 与循环 利用 | 12.0 | 可循环材料利用 | 5.0 | | |
| | | | | 旧路面材料再生 | 4.0 | | |
| | | | | 隧道弃渣利用 | 1.5 | | |
| | | | | 材料存储 | 0.5 | | |
| 新型材料使用 | | 新型材料使用 | 1.0 | | | | |
| | | 节能低碳 | 20 | 能源节约 利用 | 11.0 | 混合料节能技术 | 4.0 |
| | | | | | | 施工节能措施 | 2.5 |
| | | | | | | 节能系统 | 4.5 |
| | | | | 清洁能源 利用 | 9.0 | 可再生能源 | 4.0 |
| | | | | | | 天然气拌合站 | 5.0 |
| 品质建设 | 16 | 品质提升 | 5.0 | 长寿命路面 | 2.0 | | |
| | | | | 功能型路面 | 1.0 | | |
| | | | | 精品桥梁、隧道 | 2.0 | | |
| | | 施工 标准化 | 2.0 | 工艺标准化 | 1.0 | | |
| | | | | 工地标准化 | 1.0 | | |
| | | 管理 信息化 | 2.0 | 建设管理信息化 | 1.0 | | |
| | | | | 养护管理信息化 | 1.0 | | |
| | | 预防性 养护 | 3.0 | 预防性养护规划 | 2.0 | | |
| | | | | 预防性养护技术 | 1.0 | | |
| | | 建设管理 新技术 | 4.0 | 建筑信息模型技术 | 3.5 | | |
| HSE(健康、安全、环境) 管理体系 | 0.5 | | | | | | |
| 安全智慧 | 7 | 智能交通 系统 | 2.5 | 多元化系统 | 2.0 | | |
| | | | | 系统维护 | 0.5 | | |

| 续表 | | | | | |
|------|----|--------|-----|------------|-----|
| 一级指标 | 分值 | 二级指标 | 分值 | 三级指标 | 分值 |
| 安全智慧 | 7 | 安全设施 | 1.5 | 安全设施布设 | 1.0 |
| | | | | 安全设施维护 | 0.5 |
| | | 交通组织 | 3.0 | 施工交通组织 | 1.0 |
| | | | | 日常通行管理 | 1.0 |
| | | | | 交通应急管理 | 1.0 |
| 服务提升 | 14 | 人性化服务 | 5.0 | 信息服务 | 1.5 |
| | | | | 旅游服务功能 | 2.0 |
| | | | | ETC 技术应用拓展 | 1.0 |
| | | | | 公众满意度 | 0.5 |
| | | 绿色公路设施 | 4.0 | 加气站和充电桩 | 2.0 |
| | | | | 慢行交通 | 1.0 |
| | | | | 路侧港湾停车带 | 1.0 |
| | | 景观优化 | 5.0 | 景观融合 | 2.0 |
| | | | | 景观展现 | 2.0 |
| | | | | 景观美化 | 1.0 |

表 4 受自然环境影响的可不参评指标
Tab. 4 Invalid indexes affected by natural environment

| 三级指标 | 内容 |
|----------------|--|
| 生物及其栖息地/生态环境保护 | ①公路选线避让自然保护区、连片分布的野生动物栖息地、重要湿地等生态敏感区,无法避让时必须制定生态环境保护方案;②野生动物出没路段应设置预告、禁止鸣笛等标志,设置符合动物生态习性的通道。 |
| 水体保护 | ①跨越敏感水体的桥梁基础应采用沉入桩、灌注桩、沉井等桩基形式;②水源保护区内部无沥青混合料及混凝土搅拌站,不堆放或倾倒任何含有有害物质的材料或废弃物。 |
| 土体保护 | 冬季除冰雪采用环境友好型融雪剂、微波除雪等环保技术代替传统氯盐型融雪剂。 |
| 隧道弃渣利用 | 隧道弃渣综合利用。 |
| 节能系统 | 按照规范要求采用隧道通风智能控制系统,对隧道内废气浓度、气流风速等环境数据和交通量变化情况进行实时监控。 |
| 精品桥梁、隧道 | ①桥梁采用钢结构;②隧道采用“零开挖”进洞。 |

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^7 B_i}{\sum_{i=1}^7 A_i} = \frac{B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 + B_6 + B_7}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7} \times 100 \quad (1)$$

式中:Q 为绿色公路评估得分;B_{*i*} 为待评估公路一级指标 *i* 的实际得分;A_{*i*} 为待评估公路一级指标 *i* 的总分值。

当某评估指标因不可抗力因素造成指标缺失时,申请评估方应在评估开始前向评估机构提交不参评指标的申请资料,由评估机构对不参评指标申

表 5 受公路不同建设特点影响的可不参评指标
Tab. 5 Invalid indexes affected by different construction characteristics of highways

| 三级指标 | 内容 |
|---------|--|
| 旧路面材料再生 | 对旧路面材料进行再生利用,如沥青路面再生、水泥路面碎石化再利用等。 |
| 混合料节能技术 | 路面修补作业采用冷拌冷铺沥青混合料、自黏式沥青路面贴缝带等节能型材料或工艺。 |
| 预防性养护规划 | 按照预防性养护规划和养护措施决策方案进行预防性养护设计、施工,具有相应检测、设计、施工报告。 |
| 预防性养护技术 | 采用微表处、含砂雾封层、碎石封层、薄层罩面、超薄磨耗层等预防性养护技术。 |
| 多元化系统 | 采用 ETC 不停车收费设施,建设联网联控的公路不停车收费与服务系统。 |

请资料进行审核并最终确定不参评指标。

3.2 绿色公路评估指标体系应用

为了验证绿色公路评估指标体系与评价方法,以中国某高速公路绿色示范工程为例进行分析验证。该高速公路为双向 4 车道,绿色公路示范段全长 16.91 km,建设中将诸多新技术、新工艺、新材料及装备进行了集成应用。采用本文绿色公路评估指标体系,进行公路全寿命周期的绿色评估。由于参评公路属于新建公路,因此三级指标中的旧路面材料再生为不参评指标,其余指标均参与了评估,一级指标资源节约的分值降为 16 分。本文列出一级指标的最终得分,评估结果如表 6 所示。

表 6 某高速公路绿色公路示范段评分结果
Tab. 6 Rating results of assessed highway

| 一级指标 | 绿色理念 | 生态环保 | 资源节约 | 节能低碳 | 品质建设 | 安全智慧 | 服务提升 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 满分 | 8.0 | 15.0 | 16.0 | 20.0 | 16.0 | 7.0 | 14.0 |
| 实际得分 | 6.0 | 12.0 | 10.5 | 14.0 | 9.5 | 4.0 | 5.5 |

注:因参评高速公路涉及不参评指标,因此最终得分需按式(1)进行换算,其中评估公路指标总分值为 96 分,实际得分为 61.5 分,最终得分 $Q = \frac{61.5}{96} \times 100 = 64.06$ 。

由表 6 可知,参评公路的总分为 64.06 分,该高速公路示范段总体满足绿色公路的基本要求,但资源节约与服务提升得分较低。因此,应提高资源利用率,进一步引进节能设备、节能设施、节能技术;加强对沿线景观的优化,使道路沿线景观与区域历史文化有机协调。

4 结 语

(1)系统整理分析了中国绿色公路理念的发展

历程,明确了中国绿色公路建设发展的基本思想,并确定了中国绿色公路的基本概念。

(2)通过对中国80余条和国外部分道路的相关绿色公路建设概况的全面调查,阐明了目前绿色公路的特点,提出了中国典型区域建设绿色公路建议,并总结了绿色公路的创新性实践。

(3)基于绿色公路建设关键技术指标,通过对影响绿色公路建设因素的分析,从绿色理念、生态保护、资源节约、节能低碳、安全智慧、服务提升、品质建设7个方面,构建了包括7类一级指标、22个二级指标和58项评估内容的绿色公路评估体系;提出了绿色公路不参评指标,给出了绿色公路评估分值计算方法;通过对某高速公路示范段分析评估,验证了绿色公路评估指标体系与评价方法的科学性和适用性,为绿色公路的评估奠定了基础。

(4)今后中国绿色公路建设应对诸如建设目标不明确、建设技术不完善、建设过程不规范等问题展开更深入研究,进一步完善绿色公路的评估指标体系。

参考文献:

References:

- [1] 王新岐,张 廉,王朝辉,等.绿色公路评估指标体系研究[J].筑路机械与施工机械化,2016,33(11):34-38.
WANG Xin-qi, ZHANG Lian, WANG Chao-hui, et al. Study on the evaluation index system of green road[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2016, 33(11): 34-38.
- [2] 曾 伟,赵建雄,王朝辉,等.绿色公路评估现状与发展[J].筑路机械与施工机械化,2016,33(11):28-33.
ZENG Wei, ZHAO Jian-xiong, WANG Chao-hui, et al. Development and status of green road evaluation [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2016, 33(11): 28-33.
- [3] SANTOS B, ANTONIO A, ERIC M. Multiobjective approach to long-term interurban multilevel road network planning[J]. Journal of Transportation Engineering, 2009, 135(9): 640-649.
- [4] JABBARPOUR M R, NOOR R M, KHOKHAR R H. Green vehicle traffic routing system using ant-based algorithm[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2015, 58: 294-308.
- [5] NADERIPOUR M, ALINAGHIAN M. Measurement, evaluation and minimization of CO_2 , NO_x , and CO emissions in the open time dependent vehicle routing problem

- [J]. Measurement, 2016, 90: 443-452.
- [6] RAO J, XIE T, LIU Y. Fuzzy evaluation model for in-service karst highway tunnel structural safety[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20(4): 1242-1249.
- [7] DB 53/T 449—2013,绿色公路评价标准[S].
DB 53/T 449—2013, Evaluation criteria of green highway[S].
- [8] 王 晋,吉 光,马 军.绿色低碳公路评价指标体系与评价方法研究[J].公路,2014(7):356-361.
WANG Jin, JI Guang, MA Jun. Research on evaluation index system and method for highway with low carbon emission[J]. Highway, 2014(7): 356-361.
- [9] 李满良,郑 晨,王朝辉,等.绿色生态型城市道路评价指标体系[J].交通运输工程学报,2015,15(2):10-21.
LI Man-liang, ZHENG Chen, WANG Chao-hui, et al. Evaluation index system of green ecotype city road [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(2): 10-21.
- [10] 郝培文,蒋小茜,石 载.绿色公路理念及评价体系[J].筑路机械与施工机械化,2011,28(5):30-35.
HAO Pei-wen, JIANG Xiao-qian, SHI Zai. Concept of green road and its evaluation system[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(5): 30-35.
- [11] 蒋育红,何小洲,过秀成.城市绿色交通规划评价指标体系[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2008,31(9):1399-1402.
JIANG Yu-hong, HE Xiao-zhou, GUO Xiu-cheng. Discussion on the evaluation index system of urban green traffic planning[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2008, 31(9): 1399-1402.
- [12] 张 琴.基于可持续发展理念的绿色公路评价研究[D].重庆:重庆交通大学,2011.
ZHANG Qin. Research on assessment of green highway based on sustainable development theory[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011.
- [13] 张 杰,王京京,刘 凯.考虑环境影响的全寿命公路成本分析[J].长安大学学报:自然科学版,2014,34(3):128-132.
ZHANG Jie, WANG Jing-jing, LIU Kai. Highway life-cycle cost analysis with environment impact considered[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34(3): 128-132.
- [14] 董小林,潘 望,宋 赫,等.基于全寿命周期理论的公路项目环境成本分析[J].中国公路学报,2014,27

- (10):109-114.
- DONG Xiao-lin, PAN Wang, SONG Cheng, et al. Analysis of highway project environmental cost based on life-cycle theory[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(10):109-114.
- [15] 刘家顺. 川九公路设计与环境保护关键问题研究[D]. 成都:西南交通大学, 2007.
- LIU Jia-shun. Research of some key technology problem of the Chuanjiu Road[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [16] 黄宝涛, 田伟平, 李家春. 热带雨林地区思小高速公路景观与绿化的研究[J]. 中国园林, 2008, 24(2): 43-46.
- HUANG Bao-tao, TIAN Wei-ping, LI Jia-chun. Study on landscape and greening of Si-Xiao Expressway in tropical rain forest area[J]. Chinese Landscape Architecture, 2008, 24(2): 43-46.
- [17] 陈开圣, 殷源, 吴江. 贵黄高速公路边坡防护效果调查与分析[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(增): 120-123.
- CHEN Kai-sheng, YIN Yuan, WU Jiang. Investigation and analysis of slope protection on Guiyang to Huang Guoshu Expressway[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(S): 120-123.
- [18] 熊出华, 凌天清, 张永兴, 等. 厂拌热再生技术在成渝高速公路维修工程中的应用[J]. 中外公路, 2008, 28(2): 193-197.
- XIONG Chu-hua, LING Tian-qing, ZHANG Yong-xing, et al. Applications of plant-mixed hot recycling technology in highway maintenance of Chengyu Road[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28(2): 193-197.
- [19] 邵治亮. 沙漠高速公路生态景观植物群落选择与设计——以榆靖高速公路为例[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(6): 21-23.
- SHAO Zhi-liang. Selection and design of ecological landscape vegetation along expressway in the desert area—A case study on Yulin-Jingbian Expressway in Maowusu Sandland[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(6): 21-23.
- [20] 李定策, 叶颖, 杨帆. 模块化生态声屏障在长湘高速公路上的应用研究[J]. 公路工程, 2014, 39(3): 69-72.
- LI Ding-ce, YE Ying, YANG Fan. The application research of modular ecological sound barrier in Changsha to Xiangtan Highway[J]. Highway Engineering, 2014, 39(3): 69-72.
- [21] 薛鸥, 魏天兴, 刘飞, 等. 公路边坡植物群落多样性与土壤因子耦合关系[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(1): 91-100.
- XUE Ou, WEI Tian-xing, LIU Fei, et al. Modeling the degree of coupling and interaction between plant community diversity and soil properties on highway slope[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(1): 91-100.
- [22] 王永安, 吴宝财. 扬州西北绕城高速公路综合电力监控系统设计[J]. 公路, 2005(8): 221-223.
- WANG Yong-an, WU Bao-cai. Design of integrated electric power monitoring system for Yangzhou Northwest Ring Highway[J]. Highway, 2005(8): 221-223.
- [23] 杨阳, 杨建英, 赵平, 等. 两种框格梁生态护坡技术及其应用效果——以安徽岳武高速公路为例[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(5): 118-124.
- YANG Yang, YANG Jian-ying, ZHAO Ping, et al. Two technologies of concrete frame ecological slope protection and application effect: Taking the Anhui Yuwu Highway as an example[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(5): 118-124.
- [24] 姚宇, 檀心福. 生态防护技术在宁杭高速公路边坡防护中的运用[J]. 公路, 2005(3): 89-92.
- YAO Yu, TAN Xin-fu. Application of ecological protection technology in slope protection of Ninghang Highway[J]. Highway, 2005(3): 89-92.
- [25] 石翔, 杜钟生. 渝湛高速公路(粤境段)景观与绿化设计[J]. 公路, 2006(7): 285-288.
- SHI Xiang, DU Zhong-sheng. Landscape and planting design of Yu-Zhan Highway[J]. Highway, 2006(7): 285-288.
- [26] 徐文远, 董春艳. 鹤大公路互通立交区植物群落模式设计[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(2): 44-69.
- XU Wen-yuan, DONG Chun-yan. Plant community model design of interchange area in Heda Expressway[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(2): 44-69.